

# Промышленная теплоэнергетика

**Топливо и его сжигание**

# Общая характеристика топлива

**Топливом** называются горючие вещества, служащие источником тепла. Прежде чем использовать горючее вещество в качестве топлива, необходимо установить, что оно отвечает следующим требованиям:

- 1) запасы его велики и доступны для добычи;
- 2) продукты сгорания легко транспортируются из зоны горения и безвредны для окружающей среды;
- 3) легко загорается и содержит небольшое количество негорючих примесей (в частности, воды и золы);
- 4) процесс горения легко управляем.

# Общая характеристика топлива

По ***происхождению*** топливо подразделяется на естественное и искусственное.

Последнее является продуктом переработки естественного топлива.

По ***агрегатному состоянию*** топливо делится на твердое (кусковое, пылевидное); жидкое и газообразное. Агрегатное состояние топлива определяет способы его хранения, транспортировки и сжигания.

# Общая характеристика топлива

Агрегатное состояние	Естественное топливо	Искусственное топливо
Твердое	Древесина, торф, бурые угли, каменные угли, антрацит, горючие сланцы	Каменноугольный кокс, полукокс, древесный уголь, термоантрацит, брикеты, пылеугольное топливо
Жидкое	Нефть	Бензин, керосин, лигроин, дизельное топливо, мазут и др.
Газообразное	Природный газ	Коксовый газ, генераторный газ, доменный газ и др.

# Общая характеристика топлива

Топливо, сжигаемое в промышленных печах, называется **рабочим** топливом.

Горючими органическими элементами рабочего топлива является: углерод  $C_r$ , водород  $H_r$  и летучая сера  $S_{rl}$ . Кроме горючих элементов рабочее топливо содержит негорючие органические элементы — кислород  $O_r$  и азот  $N_r$ , входящие в состав топлива в виде сложных высокомолекулярных соединений, а также негорючие минеральные примеси, образующие после сгорания топлива золу  $A_r$  и влагу  $W_r$ .

# Общая характеристика топлива

Если отобрать пробу твердого или жидкого рабочего топлива и исследовать в химической лаборатории, определив, элементарный химический состав, то получим следующее равенство:

$$H^p + O^p + N^p + S^p + A_{\text{л}}^p + W^p + P = 100\%$$

# Общая характеристика топлива

В этой формуле содержание каждого элемента в пробе выражается в процентах от массы. Указанные элементы не составляют механическую смесь, а находятся в топливе в виде сложных химических соединений.

Однако применяемые в технике методы химического анализа твердых и жидких топлив не позволяют определить конкретный вид этих соединений. Вся сера, находящаяся в топливе, делится на две части: горючую (летучую)  $S_l^p$  и негорючую (минеральную)

$S_m^p$  тогда:

$$S_{общ}^p = S_l^p + S_m^p$$

# Общая характеристика топлива

Минеральная сера входит в состав золы. Летучую серу можно, в свою очередь разделить на две части:

**органическую**  $S_{ор}^p$

и **колчеданную**  $S_{к}^p$ , находящуюся в соединении с железом

$$S_{л}^p = S_{ор}^p + S_{к}^p$$

Сера в топливе является примесью нежелательной, так как ухудшает качество технологического продукта, отравляет окружающую среду и вредно действует на элементы конструкции печи.

# Общая характеристика топлива

Влага в топливе является балластной примесью, значительно снижающей тепловой эффект горения. Она своим присутствием уменьшает долю горючих элементов в единице массы или объема топлива и испаряясь при горении топлива отнимает часть его тепла. Влагу в твердом топливе подразделяют на **внешнюю** и **гигроскопическую**. В сухом месте топливо теряет внешнюю влагу и называется **воздушно-сухим**. Оставшаяся гигроскопическая влага удаляется из пробы лабораторным путем.

# Общая характеристика топлива

Содержание минеральных примесей и влажность одного и того же топлива из разных месторождений и при разных способах добычи могут быть различными, они также могут изменяться при транспортировке и хранении. Поэтому для сравнительной оценки топлива ввели условные понятия сухой, горючей и органической масс, составляющие которых обозначаются теми же символами, что и рабочая масса, но, соответственно, с индексами «а», «г», «о».

# Общая характеристика топлива

Исключив в лаборатории из пробы рабочего топлива влагу и подвергнув остаток пробы химическому анализу, можно получить состав сухой массы топлива, который записывается по формуле

$$H^p + O^a + N^a + S^a + A_{\text{л}}^a + \dots = 100\%$$

Данные сухого состава используются для определения засоренности топлива золой.

# Общая характеристика топлива

Исключая из сухого состава таким же способом золу, получаем состав топлива по горючей массе (безводно-беззольный состав):

$$H^g + O^g + N^g + S^g + \underset{л}{\quad}^g = 100\%$$

# Общая характеристика топлива

По структуре горючей массы определяют истинный химический состав топлива того или иного месторождения, так как здесь исключено влияние метеорологических факторов и способов добычи. По этой массе также оценивают топливо как горючее. Наиболее полно оценить качество топлива, определить время его геологического образования можно по составу его органической массы, исключив серу:

$$H^2 + O^2 + N^2 + \quad ^2 = 100\%$$

# Общая характеристика топлива

Для определения состава одной массы топлива по данным состава другой массы пользуются формулами пересчета. Покажем это на примере выражения горючей массы топлива через рабочую массу. Уравнение элементарного состава топлива представим в виде

$$\begin{aligned} H^p + O^p + N^p + S^p + \frac{p}{l} &= \\ &= 100\% - (A^p + W^p) \end{aligned}$$

# Общая характеристика топлива

Левая часть уравнения выражает теперь, состав горючей массы топлива. Отсюда на примере углерода получим:

$$C^g = C^p \frac{100}{100 - (A^p + W^p)}$$

# Общая характеристика топлива

При нагревании твердого топлива без доступа воздуха оно распадается на две части: летучие вещества и твердый остаток (**кокс** и **зола**). По количеству летучих, выделяющихся из топлива при нагреве, судят о его качестве. У молодых и низкосортных топлив выход летучих больше.

В летучие вещества переходит азот в виде сложных соединений с другими элементами, летучая сера, водород как в чистом виде, так и в соединениях с углеродом в виде различных углеводородов.

После отгонки летучих веществ из топлива образуется коксовый остаток, в который переходит часть углерода и зола.

# Общая характеристика топлива

Зола — это негорючая минеральная часть топлива, состоящая из



и др. Она образуется после сгорания топлива в виде сыпучей массы или сплавленных кусков, называемых шлаком.

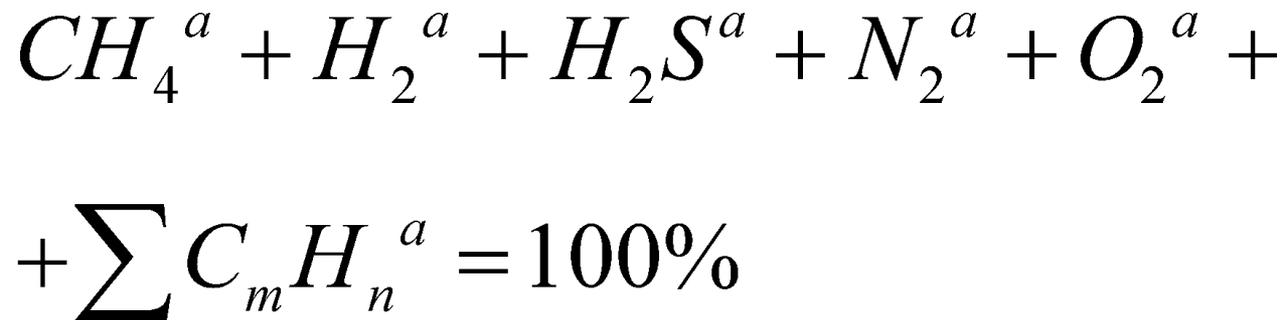
# Общая характеристика топлива

**Содержание технического анализа твердого и жидкого топлив – это и есть определение влажности, зольности и выхода летучих**

# Общая характеристика топлива

Возможности химического анализа газообразного топлива позволяют определить вид соединений, в которые объединены элементы этого топлива.

Однако этот анализ основан на нагревании пробы газа, в результате чего влага, содержащаяся в исходном газе, удаляется и определяется состав сухого газа:



# Общая характеристика топлива

Влажность топлива задается обычно в виде содержания влаги в 1 м<sup>3</sup> сухого газа, выраженного в граммах.

В природном газе основной горючей частью является метан (80 – 98% от объема газа), в качестве инертных примесей выступает диоксид углерода (0,1 -0,3%), азот (1 – 14%) и влага.

В искусственных газах горючими составляющими являются водород, окись углерода, метан, непредельные углеводороды. Искусственные газы сильно забалластированы инертными газами (азот, диоксид углерода, пары воды).

# Теплота сгорания

Количество теплоты, выделяемой при полном сгорании 1 кг твердого или жидкого, или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива, называется **теплотой сгорания топлива** или теплотворной способностью топлива и измеряется соответственно в Джоулях на килограмм или в Джоулях на кубический метр.

# Теплота сгорания

При сгорании рабочего топлива (р. т.) имеющаяся в нем влага нагревается до температуры кипения и испаряется, поглощая часть тепла, выделяемого при горении. В пар превращается также вода, образующаяся в ходе реакции окисления всех компонентов топлива, содержащих водород. Количество тепла, выделившегося при полном сгорании топлива, зависит от того, в каком агрегатном состоянии влага, присутствующая в продуктах сгорания, покидает зону горения.

# Теплота сгорания

Количество тепла, выделяющегося при полном сгорании единицы топлива при условии, что образующиеся при этом водяные пары конденсируются в зоне горения и находятся при температуре 273 К называется **высшей теплотой сгорания топлива**. Для топлива определенного химического состава высшая теплота сгорания является физико-химической характеристикой. Высшая теплота сгорания включает в себя теплоту, которая выделяется непосредственно при горении топлива и теплоту, которая может быть получена при конденсации водяных паров, образующихся в процессе горения.

# Теплота сгорания

В условиях высоких температур, наблюдаемых в рабочем пространстве металлургических печей, водяные пары в пределах зоны горения не конденсируются и вместе с другими газообразными продуктами сгорания отводятся из печи в атмосферу. Поэтому фактическое количество тепла, выделяющегося в зоне горения топлива, меньше высшей теплоты сгорания.

# Теплота сгорания

Количество тепла, которое выделяется при полном сгорании единицы топлива при условии, что испаряющаяся в процессе горения влага находится в продуктах сгорания в виде пара, охлажденного до 293 К, называется **низшей теплотой сгорания** топлива. Низшая теплота сгорания не включает в себя теплоту, выделяющуюся при конденсации водяных паров.

Низшая теплота сгорания является технической характеристикой топлива данного состава. Этой величиной определяется практическая ценность топлива.

# Теплота сгорания

Соотношение между высшей и низшей теплотой сгорания рабочего топлива выражается формулой:

$$Q_n^p = Q_v^p - 0,0251(9H^p + W^p)$$

# Теплота сгорания

Наиболее точно теплоту сгорания можно определить опытным путем сжигая пробы топлива в калориметрах и рассчитывая искомую величину из теплового баланса калориметра.

Аналитический расчет теплоты сгорания твердого или жидкого топлива затруднен тем, что не известно, в виде каких химических соединений горючие элементы входят в состав этих топлив.

На практике для расчета низшей теплоты сгорания твердого или жидкого рабочего топлива по известному элементарному составу пользуются полуэмпирической формулой Д.И. Менделеева.

# Теплота сгорания

Низшую теплоту сгорания газообразного топлива можно рассчитать, суммируя тепловые эффекты реакций окисления горючих компонентов топлива

# Условное топливо

Теплота сгорания различных видов топлива колеблется в широких пределах. Для сравнительной оценки различных видов топлив, а также для составления технических отчетов о расходовании топлива на различных агрегатах и предприятиях и для планирования работы этих предприятий необходимо иметь некоторый масштаб сравнения. В качестве такого масштаба принято **условное топливо** (у. т.), низшая теплота сгорания которого равна 29,3 МДж/кг.

# Условное топливо

Для выражения оцениваемого твердого или жидкого топлива через условное пользуются величиной **калорийного эквивалента**:

$$\mathcal{E}_H = \frac{Q_H^P}{29,3}$$

Калорийный эквивалент показывает сколько килограммов условного топлива нужно сжечь, чтобы получить столько же тепла, сколько выделяется при сжигании 1 кг рабочего топлива.

# Условное топливо

Для сопоставления газообразных видов топлив пользуются **коэффициентом теплоплотности**:

$$\mathcal{E}_m = \frac{Q_n^p}{29,3}$$

# Условное топливо

С помощью коэффициента теплоплотности оценивают также экономичность хранения и перевозки всех видов топлива. Например, торф имеет не только невысокий калорийный эквивалент, но и вследствие небольшой объемной массы, низкий коэффициент теплоплотности, что обуславливает его нетранспортабельность.

Для получения одного и того же количества тепла объем транспортируемого торфа почти в семь раз больше объема транспортируемого угля. В связи с этим торф, низкосортные угли и некоторые другие виды топлива относят к категории местных топлив. Такое топливо независимо от размеров его запасов, нецелесообразно транспортировать на значительные расстояния от мест добычи.

# Топливо, применяемое в металлургии

## Твердое естественное топливо

В современной металлургии твердое естественное топливо применяется ограниченно. Большинство топливных печей имеют газовое, мазутное или смешанное газо-мазутное отопление. Только некоторые печи, в основном цветной металлургии, отапливаются пылеуглем.

# Топливо, применяемое в металлургии

Из твердых естественных топлив в металлургии применяются только ископаемые угли. На территории РФ из всех ископаемых углей наиболее распространен каменный уголь (80 %).

В зависимости от выхода летучих веществ и спекаемости различают 10 сортов (марок) углей:

- Д— длиннопламенный,
- Г— газовый,
- ГЖ - газовый жирный,
- Ж— жирный,
- КЖ — коксовый жирный,
- К- коксовый,
- К2 — коксовый второй,
- ОС — отощенный спекающийся,
- СС - слабоспекающийся,
- Т — тощий.

# Топливо, применяемое в металлургии

Большая часть каменных углей — спекающиеся. К неспекающимся относятся, в основном, длиннопламенные и тощие угли (с выходом летучих выше 45% и ниже 15%. Балласт, т. е. содержание золы и влаги, колеблется в каменных углях от 12 до 20 %, а теплота сгорания составляет 29,3-23,0 МДж/кг.

# Топливо, применяемое в металлургии

Антрацит отличается от каменных углей тем, что при его горении не образуются углеводороды, поэтому он горит коротким пламенем и совершенно бездымно. Содержание горючих летучих веществ в антраците составляет около 7%. Антрациты очень тверды и зажигаются с большим трудом. Содержание внешнего балласта в антраците составляет 12-25%. Теплота сгорания равна 25-29,3 МДж/кг.

# Топливо, применяемое в металлургии

## Твердое искусственное топливо.

Из искусственных твердых топлив в металлургии используются **кокс** и **термоантрацит**.

Металлургический кокс представляет собой крупные, механически прочные куски, устойчивые к истиранию. Это наиболее дорогое из всех видов металлургических коксов. Кокс используют в доменных печах. На кокс расходуется более  $1/3$  всех добываемых каменных углей.

# Топливо, применяемое в металлургии

В процессе коксования измельченную до кусков размером 3 мм и увлажненную угольную шихту подвергают нагреву без доступа воздуха до температуры 1100-1300 К в течение 15-16 ч. По мере нагрева шихты до температуры 473 К протекает процесс сушки, при температуре 473 К начинают выделяться первичной смолы, состоящей из углеводородов жирного ряда. При температуре 623-673 К часть угля (битуминозные вещества) плавится и растворяет в себе его неплавкие элементы.

Образовавшаяся подвижная пластическая масса растекается между оставшимися твердыми зернами угля и склеивает (спекает) их. При нагреве до 773 К происходит бурное разложение пластической массы, сопровождающееся выделением газов и образованием твердого полукокса.

# Топливо, применяемое в металлургии

При дальнейшем нагреве выделяется значительное количество газов, преимущественно водорода и метана. Твердый остаток уплотняется, дает усадку и превращается в губкообразный спек, называемый коксом.

# Топливо, применяемое в металлургии

Для производства кокса используют каменные угли различных марок, из которых составляют коксовую шихту. Наилучшим сырьем для производства является уголь марки К. В связи с небольшими запасами этого угля, его используют в смеси с другими марками.

Теплота сгорания кокса  $\sim 27,5$  МДж/кг. —

# Топливо, применяемое в металлургии

В ходе коксования образуются побочные продукты: коксовый газ, каменноугольная смола, аммиак, сернистый бензол, подсмольная вода.

Побочные продукты направляются на химический завод для переработки. Выход летучих из нормально выжженного кокса не превышает 1,4-1,9%. По этой цифре судят о завершении процесса коксования.

# Топливо, применяемое в металлургии

Коксовая печь состоит из трех основных частей: камеры коксования, вертикальных отапливаемых каналов, предназначенных для сжигания топлива, и регенераторов - устройств для утилизации тепла отходящих газов.

Отапливаемые каналы отделены от камеры коксования огнеупорными стенками. Камеры коксования представляют собой прямоугольные каналы, размеры которых примерно равны 13X 4,5 X 0,4 м. Торцовые части камер закрываются металлическими откатными дверями.

# Топливо, применяемое в металлургии

Угольную шихту загружают в камеры через люки, расположенные в сводах. Образование пластического слоя начинается у внутренних стен отапливаемых каналов и распространяется к центру камеры коксования. Газы и пары, образующиеся в процессе коксования, собираются в надслоевом пространстве камеры, откуда направляются в газосборник.

# Топливо, применяемое в металлургии

## Жидкое топливо

Из всех видов жидкого топлива в металлургии используется а основном **мазут**. Высокая теплотворная способность мазута и хорошие теплотехнические качества делают его ценным топливом.

Мазут представляет собой остаток от фракционной перегонки нефти, в ходе которой из сырой нефти предварительно отогнаны бензин, лигроин, керосин и газойль. Зольность мазута ничтожна. Влажность в пределах 1-3%. Теплота сгорания 38-42 МДж/кг.

Качество мазута определяется его физическими свойствами: вязкостью, температурой вспышки и температурой застывания.

**Температурой вспышки** называется температура, при которой пары мазута в смеси с воздухом вспыхивают при приближении пламени. Эта температура значительно ниже **температуры воспламенения**, при которой жидкий мазут воспламеняется самопроизвольно без воздействия постороннего пламени.

Важным показателем качества мазута является **температура застывания**. При этой температуре мазут теряет свойства жидкости и превращается в твердое тело.

# Топливо, применяемое в металлургии

В настоящее время наиболее распространены топочные мазуты трех марок:

- М-40
- М-100
- М-200.

Цифры в обозначениях марок соответствуют максимальному значению условной вязкости мазута при температуре 333 К.

# Топливо, применяемое в металлургии

Чем выше марка мазута, тем ниже его теплота сгорания. По мере увеличения марки мазута растет содержание в нем парафинов, вследствие чего растет вязкость, повышаются температуры вспышки и застывания. Высокие вязкость и температура застывания затрудняют транспортирование мазута по труба и распыливание при сжигании. Поэтому мазут приходится подогревать тем выше, чем больше номер марки. При выборе температуры подогрева, необходимо учитывать, что при температурах, близких к температуре вспышки, значительно увеличивается пожарная опасность.

# Топливо, применяемое в металлургии

Обычно мазут подогревают до 340-390 К. Первоначально его подогревают в цистернах, баках, нефтехранилищах для перекачки по трубам. Для этого устанавливают в них змеевики, обогреваемые паром или горячей водой с температурой не выше 420 К. Нефтехранилища и баки должны обязательно соединяться с атмосферой.

Наружные мазутопроводы тщательно утепляют или прокладывают совместно с паропроводами. Мазут, подаваемый к форсункам, дополнительно подогревается в теплообменниках.

Подогрев мазута не только повышает его текучесть, но и способствует лучшему отстаиванию воды. Брать мазут из мазутохранилища нужно из верхних слоев, которые полнее отстоялись от воды. Для лучшего сжигания мазута в мазутопроводе необходимо поддерживать постоянное давление. С этой целью на нем устанавливают автоматические клапаны.

# Топливо, применяемое в металлургии

**Газообразное топливо** в настоящее время является основным видом органического топлива, применяемого для отопления металлургических печей.

Достоинства этого топлива:

- легкость в управлении процессом горения,
- удобство транспортировки,
- возможность создания газовых смесей, обладающих различной теплотой сгорания,
- практически полное отсутствие серы и ее соединений.

# Топливо, применяемое в металлургии

Существенными недостатками газообразного топлива являются:

- его низкая плотность, в результате чего приходится перекачивать по трубопроводам большие объемы газов,
- взрывоопасность, что вынуждает принимать специальные меры для обеспечения взрывобезопасности и пожарной безопасности.

# Топливо, применяемое в металлургии

## Естественное газообразное топливо.

Наиболее ценным газообразным топливом является природный газ. Природный газ почти целиком состоит из водородов (80 - 98% ). В качестве инертных примесей в нем присутствуют диоксид углерода (0,1-0,3%), азот (1 – 14%) и влага. Теплота сгорания природного газа 33,5-35,6 МДж/м<sup>3</sup>.

# Топливо, применяемое в металлургии

В металлургии применяют также газы вулканического происхождения, которые практически полностью состоят из метана (до 98%), и попутные газы нефтяных месторождений, в состав которых помимо метана входят также этан и другие тяжелые водороды.

# Топливо, применяемое в металлургии

## **Искусственное газообразное топливо.**

В металлургии широко используется искусственные горючие газы:

- получаемые либо в качестве побочного продукта производства (коксовый газ, доменный газ, и т.д.)
- или в результате термообработки твердого топлива в газогенераторах (газогенераторные газы).

# Топливо, применяемое в металлургии

**Коксовый газ** является побочным продуктом коксового производства. Сырой газ, выходящий из коксовых печей, называется прямым. Он содержит следующие примеси:

- бензол и другие углеводороды;
- аммиак;
- нафталин;
- сероводород;
- цианистые соединения.

Для улавливания этих примесей, являющихся ценным сырьем химической промышленности, коксовый газ направляют на очистку.

# Топливо, применяемое в металлургии

Очищенный коксовый газ называется обратным. Его состав зависит от состава угля, подвергнутого коксованию. Содержание водяных паров доходит до 55 г/м<sup>3</sup> при температуре 313 К. Теплота сгорания сухого газа составляет 16-18 МДж/м<sup>3</sup>.

# Топливо, применяемое в металлургии

Доменный газ является побочным продуктом доменной плавки в ходе взаимодействия газообразных продуктов сгорания кокса, (движущихся от фурменной зоны доменной печи к колошнику), с опускающейся вниз шихтой, прежде всего с кусками кокса.

Происходит восстановление диоксида углерода до оксида углерода. При этом продукты сгорания обогащаются горючим компонентом. Кроме оксида углерода в доменный газ переходят водород, метан и другие углеводороды.

# Топливо, применяемое в металлургии

Роль доменного газа, как источника тепла на металлургическом заводе, несмотря на низкую теплоту сгорания, значительна, что связано с большими объемами газов, образующихся в ходе доменной плавки. Смешивание доменного газа с коксовым или природным позволяет обеспечить необходимую теплоту сгорания.

# Топливо, применяемое в металлургии

**Генераторные газы** могут быть получены в любом месте, где имеется любое твердое топливо, путем газификации этого топлива. Процесс газификации заключается в превращении твердого топлива в горючий газ под воздействием кислорода. При этом может быть использован чистый кислород, кислород воздуха или же кислород, содержащийся в водяных парах и в диоксиде углерода.

Горючая часть твердого топлива превращается в газ и пары без остатка (за вычетом потерь).

Процесс газификации проходит в аппарате, называемом газогенератором

# Теория горения

## Общая характеристика процесса горения

**Горением** называется всякая быстро протекающая реакция, сопровождающаяся выделением тепла и света. В теплотехнике горением называют процесс взаимодействия топлива с кислородом.

В качестве источника кислорода используют:

- воздух,
- дутье, обогащенное кислородом,
- чистый кислород.

Увеличение концентрации кислорода в дутье ускоряет процесс горения и повышает температуру в зоне горения. Однако в связи с высокой стоимостью кислорода при сжигании топлива чаще всего используют воздух

# Теория горения

Сжигание топлива в пламенных печах осуществляется в факеле. Факел — это струя, состоящая из компонентов, обладающих различными физическими свойствами (топлива, воздуха и продуктов сгорания), в пределах которой осуществляется горение.

Собственно реакция горения протекают в узкой полосе внутри факела, называемой **фронтом пламени**.

Фронт пламени делит факел на две зоны внутреннюю и внешнюю. Во внутреннюю зону подается топливо и окислитель (либо только топливо), туда же диффундирует из фронта пламени часть высокотемпературных продуктов сгорания. Во внешней зоне находятся продукты сгорания, либо продукты сгорания и окислитель.

# Теория горения

Горение представляет собой сложный физико-химический процесс, в котором химическая реакция протекает совместно с рядом физических процессов:

- перемешиванием топлива с кислородом и образованием горючей смеси,
- разогревом этой смеси за счет теплоты продуктов сгорания,
- отводом продуктов сгорания из зоны реакции.

Наибольшее влияние на процесс горения оказывает самый медленный из перечисленных процессов - смешение топлива с воздухом. Перемешивание топлива с окислителем происходит за счет молекулярной и турбулентной диффузии.

# Теория горения

Для регулирования процесса смесеобразования применяют специальные устройства, называемые **горелками**, основной задачей которых является обеспечение определенного режима перемешивания топлива с воздухом.

При сжигании жидкого топлива в горелку вставляется **форсунка**, задачей которой является дробление топлива на мелкие капли перед перемешиванием его с воздухом.

Обычно комбинацию горелки с форсункой называют просто форсункой.

# Теория горения

Горение заранее подготовленной смеси называют **кинетическим**, а горение, протекающее одновременно со смесеобразованием — **диффузионным**.

При сжигании предварительно подготовленной горючей смеси скорость горения определяется кинетикой реакции, а при сжигании предварительно не подготовленной смеси - скоростью диффузионных процессов.

# Теория горения

В зависимости от агрегатного состояния топлива различают горение газа — **гомогенное** горение, и горение твердого или жидкого топлива — **гетерогенное** горение.

При гомогенном горении процесс протекает одновременно во всем объеме, заполненном достаточно разогретой горючей смесью.

При гетерогенном горении он протекает на границе раздела фаз, например, на поверхности частички угля.

# Теория горения

Гетерогенное горение включает в себя элементы гомогенного. При нагреве из частички угля перед ее воспламенением выделяются летучие, которые у поверхности частички, смешиваются с кислородом, образуют горючую смесь, сгорающую в режиме гомогенного горения.

Капли мазута при нагреве испаряются. Образующиеся пары горючего смешиваются с окислителем и сгорают также в режиме гомогенного горения. Таким образом, закономерности гомогенного горения свойственны в той или иной степени горению всех видов топлива.

В связи с этим основы теории горения излагаются на примере горения предварительно подготовленной газовой смеси.

# Теория горения

## Кинетика реакций горения.

### Тепловой механизм реакций

Согласно молекулярно-кинетической теории газов химическая реакция возникает в результате столкновений молекул реагирующих веществ. Скорость химических реакций определяется числом активных столкновений в единицу времени. При активных столкновениях сумма кинетических энергий сталкивающихся молекул равна или больше энергии активации данной реакции. Так как энергия молекул характеризуется значением температуры газовой смеси, подобные столкновения возможны только в том случае, если смесь предварительно подогрета до определенной температуры, т.е. подвергнута тепловой активации.

# Теория горения

Зависимость скорости реакции от температуры описывается уравнением С. Аррениуса:

$$k = k_0 e^{-(E/RT)},$$

где  $k$  - константа скорости реакции;

$k_0$  - коэффициент, численно равный общему числу столкновений молекул в единице объема в единицу времени при концентрации реагирующих веществ 1 кмоль/м<sup>3</sup>;

$R$  - Универсальная газовая постоянная;

$T$  - Температура реакции;

$E$  - Энергия активации

# Теория горения

Скорость бимолекулярной реакции выражается уравнением:

$$g = kab,$$

где  $a, b$  - концентрация молекул реагирующих веществ в смеси, выраженная в долях от единицы

# Теория горения

## Цепной механизм реакции

Некоторые реакции протекают без заметного предварительного разогрева. Они возникают внезапно, протекают при низких температурах при высокой скорости. Исходные вещества превращаются в конечный продукт через образование активных промежуточных продуктов. Цепные реакции бывают с разветвленной или с неразветвленной цепью.

# Теория горения

Скорость реакций горения выражается уравнением:

$$g = k_0 C^n e^{-(E/RT)},$$

где  $C$  концентрация топлива в горючей смеси

# Теория горения

## Возникновение пламени

Способы воспламенения горючей смеси:

- Самовоспламенение. Смесь целиком разогревают до температуры воспламенения, горение возникает одновременно во всем объеме.
- Зажигание (вынужденное воспламенение). Холодная смесь зажигается в одной точке от постороннего источника

# Теория горения

## Режимы горения:

- Нормальное горение. При этом фронт перемещается равномерно с постоянной скоростью. Перепад давления на фронте пламени отсутствует.
- Вибрационное горение. При этом фронт перемещается со изменяющейся скоростью (как по величине, так и по направлению).
- Детонационное горение (взрыв). При этом фронт пламени перемещается с постоянной скоростью порядка 1000 м/с. Значительный перепад давлений на фронте.

# ПЛАМЯ. Требования к пламени

В пламенных печах при сжигании газообразного или жидкого топлива образуется **пламя** (факел) - объем, в котором протекают и завершаются процессы сгорания горючих компонентов топлива. В пламени происходит выделение тепла, которое распространяется по печному пространству. Теплоотдача от пламени определяется в основном теплоотдающими характеристиками и условиями, в которых происходит процесс передачи тепла.

Пламя является важнейшим, но лишь одним из компонентов теплообмена в рабочем пространстве печей. Наряду с пламенем в состоянии взаимного теплообмена находятся нагреваемый материал, футеровка и различные элементы печи. Все они имеют соответствующие температуру и теплообменные характеристики.

# ПЛАМЯ. Требования к пламени

**Калориметрическая** температура зависит лишь от условий сжигания топлива (расхода воздуха, теплоты сгорания, температуры подогрева воздуха и топлива).

Однако пламя, возникающее при сжигании топлива, находится не в адиабатических условиях, а в условиях интенсивного теплообмена с обрабатываемым материалом и элементами печи. Поэтому **действительная** температура пламени существенно отличается от калориметрической. Таким образом действительная температура пламени зависит как от величины калориметрической температуры, так и от условий теплообмена, в которых находится пламя.

# ПЛАМЯ. Требования к пламени

Действительная температура пламени в рабочем пространстве определяется назначением печи и выбирается в соответствии с технологией обработки материала. Для достижения требуемой по условиям технологии действительной температуры необходимо сжигать топливо с обеспечением соответствующей калориметрической температуры. Точное количественное соотношение между калориметрической и действительной температурой установить трудно, так как оно зависит от множества факторов.

# ПЛАМЯ. Требования к пламени

Таким образом, важнейшим требованием к пламени является обеспечение необходимой температуры. Важную роль играет не только абсолютная величина температуры пламени, но и распределение температуры по длине и ширине рабочего пространства печи. Тепловой поток от пламени зависит от температуры в четвертой степени.

# ПЛАМЯ. Требования к пламени

Большое значение имеет расположение факелов в рабочем пространстве печи. Наиболее распространенными являются продольное расположение факелов, поперечное (боковое) и сводовое (вертикально вниз в сторону обрабатываемого материала). При продольном расположении факелов распределение температуры по длине пламени определяется графиком изменения температуры по длине печи.

# ПЛАМЯ. Требования к пламени

Если требуется обеспечить постепенное изменение температуры по длине печи, то необходимо обеспечить такое сжигание топлива, при котором температура пламени будет постепенно убывать по его длине.

Если необходимо обеспечить наиболее высокую температуру в той зоне печи, где установлены горелки (форсунки) с ее последующим быстрым убыванием, то и способ сжигания топлива при этом должен обеспечивать соответствующий график изменения температуры газового объема (пламени).

# ПЛАМЯ. Требования к пламени

Поперечное (боковое) расположение факелов применяют в достаточно широких печах. Такое отопление должно обеспечивать не только нужную интенсивность нагрева, но и обязательно равномерность нагрева металла по ширине печи, для чего необходимо равномерное распределение температуры по длине пламени.

# ПЛАМЯ. Требования к пламени

Основную роль в теплообмене в рабочем пространстве печи играют процессы теплообмена излучением и конвекцией. Теплообмен излучением между пламенем, кладкой и металлом зависит не только от температуры, но и от радиационных характеристик этих компонентов теплообмена, т. е. от величины их излучательной и поглощательной способности: обрабатываемый в печи материал обычно имеет величину поглощательной способности, отличную от серого тела.

## ПЛАМЯ. Требования к пламени

Учитывая активную роль кладки в теплообмене в рабочем пространстве пламенной печи, целесообразно радиационные характеристики пламени и кладки выбирать таким образом, чтобы обеспечивалась наивысшая величина поглощенного притока на поверхности обрабатываемого материала.

# ПЛАМЯ. Требования к пламени

Создать пламя, имеющее сплошной спектр излучения, достаточно сложно. В пламени возможны практически два источника излучения: трехатомные газы ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ) и сажистые частицы, возникшие в результате разложения углеводородов топлива при естественной или искусственной карбюрации пламени.

Газы, находящиеся в пламени, имеют линейчатый спектр излучения в инфракрасной области спектра (невидимой для человека), сажистые частицы, наоборот, наибольшее количество тепловой энергии излучают в видимой для человека области спектра.

# ПЛАМЯ. Требования к пламени

Существуют различные способы сжигания топлива, при которых в пламени в результате термического разложения углеводородов топлива возникают сажистые частицы. Чем больше углеводородов в топливе, тем больше возможность для создания светящегося пламени.

Роль пламени не ограничивается его участием в теплообмене излучением. Пламя (факел) образуется струями топлива и воздуха и является важнейшей составляющей общего движения в печах, Движение газов определяет такие решающие факторы работы печей, как теплоотдача конвекцией и равномерность распределения температуры по рабочему объему печи.

## ПЛАМЯ. Требования к пламени

Факельные струи оказывают влияние на распределение давления по длине и высоте печи, от чего в свою очередь зависит качественный уровень работы печного агрегата, так как изменение давления вызывает нормальные или излишние подсосы холодного воздуха в печь и выбивание раскаленных газов из печи.

## ПЛАМЯ. Требования к пламени

В ряде случаев к пламени предъявляются требования по ограничению его аэродинамической длины. Наибольшее значение это имеет при боковом расположении факела. Факельная струя раскаленных газов, несущая частицы сажи, окалины, ударяя о противоположную стенку, оказывает на нее разрушающее влияние. Поэтому допустимая аэродинамическая длина пламени должна строго увязываться с продолжительностью, в которой происходит сжигание топлива.

# ПЛАМЯ. Требования к пламени

Таким образом, пламя должно отвечать следующим основным требованиям:

- 1) иметь максимально необходимую для данного типа печи температуру;
- 2) иметь целесообразное распределение температуры по объему печи и обеспечивать наивысший уровень теплоотдачи излучением и конвекцией;
- 3) в необходимых случаях должно обеспечивать должное развитие массообменных процессов;
- 4) влияние факельных струй на характер движения газов в печах должно быть позитивным — способствуя выравниванию температуры и развитию процессов конвективного теплообмена, факельные струи не должны разрушать элементов печи и не должны приводить к подсосу холодного воздуха в печь и чрезмерному выбиванию раскаленных газов.

## ПЛАМЯ. Требования к пламени

Из вышеизложенного ясно, что, кроме температуры и ее изменения по длине пламени, большое практическое значение имеют аэродинамические и теплообменные характеристики пламени.

# Расчёт процессов горения топлива

Пусть уравнение элементарного состава топлива имеет вид:

$$C + H + S_{\text{л}} = 100;$$



Для сжигания 12 кг углерода требуется 32 кг кислорода.

$$12 \text{ кг (C)} - 32 \text{ кг (O)},$$

$$1 \text{ кг (C)} - x \text{ кг (O)},$$

$$x = 2,67 \text{ кг.}$$

Следовательно, для сжигания 1 кг углерода необходимо 2,67 кг кислорода.

# Расчёт процессов горения топлива

б)  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ . Для сжигания 4 кг  
водорода необходимо 32 кг кислорода.

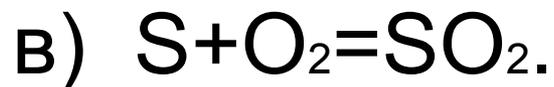
4 кг (H) – 32 кг (O),

1 кг (H) – x кг (O),

x=8 кг.

Следовательно, для сжигания 1 кг  
водорода необходимо 8 кг кислорода

# Расчёт процессов горения топлива



Для сжигания 32 кг серы необходимо 32 кг кислорода. Следовательно для сжигания 1 кг серы необходимо 1 кг кислорода.

# Расчёт процессов горения топлива

Количество кислорода, требуемое для сжигания 1 кг  
топлива:

$$G_O^T = 2,67C + 8H + S - O, \text{ м}^3$$

Количество воздуха, необходимого для сжигания 1 кг  
топлива:

$$V_B^T = \frac{G_O^T}{\rho \cdot \gamma}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}},$$

где  $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  - плотность воздуха,

$\gamma$  - содержание кислорода в воздухе, %.

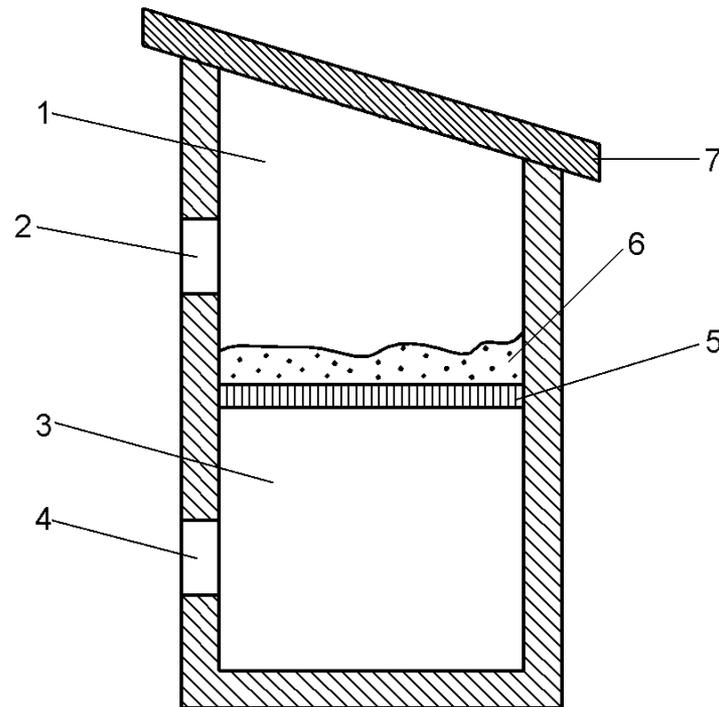
Действительное необходимое количество воздуха:

где  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха

$$V_B^D = V_B^T \cdot \alpha, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

# Топочные устройства

Ручная топка для сжигания твёрдого топлива



# Топочные устройства

- 1 – рабочее пространство
- 2 – окно для загрузки топлива
- 3 – зольник
- 4 – окно для удаления золы и шлака
- 5 – колосниковая решётка
- 6 – слой топлива
- 7 – трубы котла.

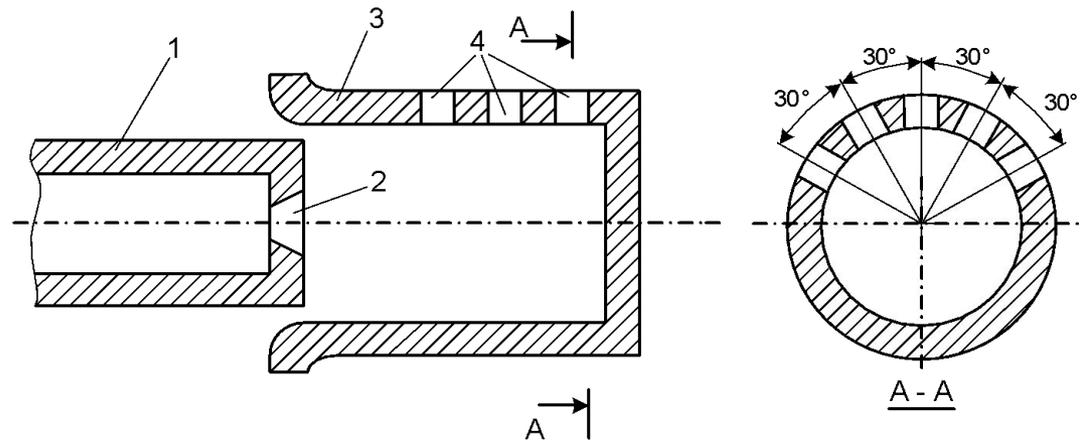


# Топочные устройства

- 1 – бункер с топливом
- 2 – шиберный затвор
- 3 – подвижная колосниковая решётка
- 4 – скребок
- 5 – бункер для шлака
- 6 – трубы котла
- 7 – рабочее пространство топки
- 8 – слой топлива
- I – зона подогрева топлива до температуры воспламенения
- II – зона горения топлива
- III – зона охлаждения шлака.

# Топочные устройства

## Газовая горелка



1 – труба для подачи газа

2 - форсунка

3 - смеситель

4 – отверстие для выхода газовой смеси.